基于声发射优势信号筛选的浸水煤岩破坏前兆研究*

苏海燕[1,2,3],朱俊[1,2],刘子明[1,2],马元军[4],张勇[5]

(1.中国科学院 水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610299;
2.中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610299;
3.中国科学院大学, 北京 101408;
4.成都信息工程大学 物流学院, 四川 成都 610225;
5.煤炭开采水资源保护与利用全国重点实验室, 北京 102209)

摘要:针对浸水煤岩破裂过程中低能声发射(AE)信号占比过高、高能关键信息易被掩盖,导致破坏前兆识别精度不足的难题,开展了自然状态与浸水120 h煤岩的单轴压缩与声发射同步试验。基于能量贡献率与损伤应力构建了AE信号筛选新方法,提取煤岩破裂的优势信号并分析其前兆特征。结果表明:浸水显著降低了煤岩的单轴抗压强度,相比自然状态煤岩,浸水煤岩平均单轴抗压强度降低14.79%,裂纹呈现多向扩展特征,加剧了煤岩的最终破裂程度;自然状态煤岩的累计AE计数达到4×10^6次,而浸水煤岩的累计AE计数降至2×10^6次,累计AE计数与煤岩的应力-应变曲线具有较好的一致性;基于能量贡献率与损伤应力时间窗口构建的声发射优势信号提取方法,可有效提取浸水煤岩破裂过程中的优势信号,其能量阈值低于自然状态煤岩,但优势信号占比更高,提取的优势信号与浸水煤岩破坏前兆高度一致。研究结果可为工程稳定性预测提供理论依据。

关键词:浸水煤岩;优势信号筛选;前兆特征;单轴抗压强度;声发射振铃计数

中图分类号:TD315 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)06-0129-11

Research on Failure Precursor of Water-Soaked Coal-Rock Based on Acoustic Emission Dominant Signals Screening

Su Haiyan[1,2,3], *Zhu Jun*[1,2], *Liu Ziming*[1,2], *Ma Yuanjun*[4], *Zhang Yong*[5]

(1.Institution of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610299, China;
2.Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process,
Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610299, China;
3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;
4.School of Logistics, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China;
5.State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102209, China)

Abstract: To address the problem that low-energy acoustic emission (AE) signals account for an excessively high proportion during the fracture process of water-soaked coal-rock, high-energy critical information to be easily masked, resulting in insufficient accuracy in failure precursor identification, synchronous uniaxial compression and acoustic emission tests were conducted on coal-rock specimens under natural conditions and after 120 h of water-soaked. Based on the energy contribution rate and damage stress, a novel AE signal screening method was developed to extract dominant signals during coal-rock failure and investigate their precursory characteristics. The results show that water-soaked significantly decreases the uniaxial compressive strength of coal-rock. Compared with specimens under natural conditions, the average uniaxial compressive strength of water-soaked coal-rock decreases by 14.79%. Cracks exhibite multidirectional propagation behavior, thereby aggravating the final failure of the coal-rock. The cumulative AE count of coal-rock specimens under natural conditions reach 4×10^6, while that of water-soaked specimens decrease to 2×10^6. Moreover, the evolution of the cumulative AE count shows good agreement with the stress-strain behavior of the coal-rock. The AE dominant signal extraction method based on the energy contribution rate and damage-stress time window effectively identifies dominant signals during the failure process of water-

* **收稿日期**:2025-05-28

基金项目:煤炭开采水资源保护与利用全国重点实验室开放基金项目(WPUKFJJ2022-06);国家自然科学基金青年基金项目(42307251)

作者简介:苏海燕(1997—),女,四川攀枝花人,硕士,主要从事岩石(体)损伤智能监测与量化评估研究。E-mail:suhaiyan@imde.ac.cn

通信作者:朱俊(1989—),男,湖南衡阳人,博士,副研究员,主要从事岩土工程方面的研究。E-mail:zhujun@imde.ac.cn

soaked coal-rock. Compared with coal-rock under natural conditions, the extracted dominant signals exhibite lower energy thresholds but higher signal proportions. Furthermore, the extracted dominant signals show strong correspondence with the failure precursors of water-soaked coal-rock. These findings provide a theoretical basis for engineering stability prediction.

Key words: Water-soaked coal-rock, Dominant signals screening, Precursory characteristy, Uniaxial compressive strength, Acoustic emission ringing count

0 引言

煤矿地下水库煤柱坝体长期浸水易发生矿物溶解等问题,使煤岩力学性能劣化,从而诱发煤柱坝体失稳破坏[1-4]。对此,深入研究浸水作用下煤岩的破坏前兆特征具有重要的理论意义和工程应用价值。

针对浸水对煤岩力学性质的影响,学者们围绕强度、弹性模量及破坏形式开展了系统研究。杨夺等[5]利用 CMT5305 微机控制电子万能试验机,测试了煤岩抗压强度,发现颗粒结构、矿物组成及硬度等因素决定了水对其强度的影响和软化效果。吴宝杨等[6]系统研究了不同浸水作用下煤岩的力学损伤规律,发现煤岩的抗压强度和弹性模量均随含水量的增加线性下降,内部剪切裂缝比例随含水量的增加而增大。徐达[7]通过浸润煤岩力学特性试验,探讨了水-岩作用对煤岩力学特性的影响,发现煤岩饱水后,其抗压强度和弹性模量随浸水时间的增加而减小,破坏模式由脆性破坏逐渐转变为延性破坏。郝俊[8]通过研究不同浸水环境中煤岩的强度及刚度演变规律,发现随着含水率提高,煤岩单轴抗压强度线性减小,弹性模量指数同步减小,煤岩体表现出塑性增强和脆性减弱特征。

声发射技术可以监测岩石材料的损伤演化与破坏过程。近年来,许多学者将声发射技术作为核心研究方法,系统探讨了煤岩在破坏时的声发射预警特征。刘保县等[9]研究揭示了声发射参数与煤岩力学破坏机制之间的联系,发现声发射信号与煤岩内部原生裂隙压密、新裂隙萌生、扩展及贯通等过程密切相关。尹光志等[10]开展了不同应力加载路径下的声发射特征试验,发现在卸围压路径下,含瓦斯煤岩表现出明显的声发射破坏前兆信号,包括累积振铃计数斜率显著增大、声发射幅值曲线呈双峰特征等。李杨等[11]开展了不同岩性煤岩声发射特征参数研究,将达到应力峰值过程中出现短暂的声发射平静期定义为致灾前兆信息点。胡千庭等[12]研究了煤岩破坏过程的声发射特征,发现破坏前声发射 b 值下降是煤岩破裂失稳的重要前兆信息。冯龙飞等[13]开展了冲击倾向性煤岩微破裂特征的演化及其前兆识别研究,发现峰前高能量事件的集中区域与峰后冲击破坏的位置基本相同。王恩元等[14]指出煤岩声发射的频谱特征变化与煤岩破裂过程密切相关,随着载荷增加,声发射主频带明显升高。张艳博等[15]采用频谱分析与信息熵理论,研究了干燥及饱水状态下煤矸石破裂全过程的声发射信号变化,发现干燥和饱水煤矸石的声发射信号均存在 2 个主频带,且主频在破裂前发生突变。

结合已有研究结果可知,煤岩破裂失稳前兆分析需重点关注较大尺度破裂事件所产生的高能信号,因此,建立有效的声发射信号提取方法,对浸水煤岩破裂失稳前兆的特征研究至关重要。本研究通过提出新方法,提取浸水煤岩破裂过程中的优势信号,以准确判识与分析浸水煤岩破坏的前兆信息。研究结果可为浸水煤岩破裂前兆特征的深入研究提供可靠依据。

1 试验方法与过程

1.1 煤岩矿物学特征

通过 X 射线全岩定量分析(XRD)获得煤岩样品的衍射图谱,以确定煤岩的矿物成分及含量,结果如图 1 所示。基于数据库分析图谱衍射峰发现,煤岩的全岩矿物包括石英(3.7%)、方解石(9.3%)、铁白云石(2.8%)、非晶质(84.2%)。

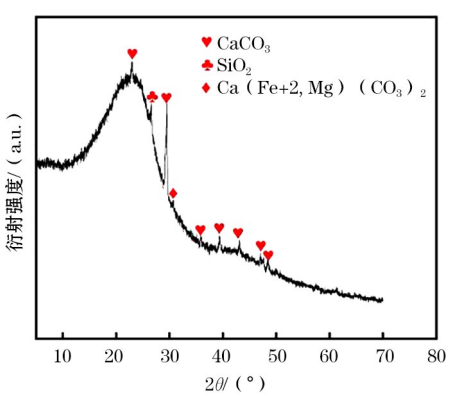


图 1 煤岩样品 X 射线衍射图谱

Fig.1 X-ray diffraction patterns of coal-rock samples

1.2 试样制备

试验煤样取自内蒙古自治区鄂尔多斯市伊金霍洛旗窝兔沟煤矿区。岩芯按照国际岩石力学学会

(ISRM)推荐方法加工，制成 Φ50 mm×100 mm 的标准圆柱体，试件两端不平行度控制在±0.05 mm 以内，端面保持垂直于试样轴线，轴向偏差不超过±0.25°。

加工后的煤岩分为自然状态组和浸水处理组。将浸水处理组煤岩放入蒸馏水中进行浸水处理，浸水时长为 120 h。浸水完成后，擦干表面水分，测量并记录煤岩质量和含水率等参数，具体测试结果见表 1。

表 1　煤岩试样物理参数测试结果

Table 1　Test results of physical parameters of coal-rock samples

试样编号	试样状态	高×直径/mm	质量 M/g	含水率 w/%
CN1	自然状态	98.97×49.98	255.7	—
CN2		99.74×49.86	256.9	—
CN3		99.91×49.67	254.1	—
CS1	浸水 120 h	99.79×49.96	258.9	1.37
CS2		99.97×48.94	257.6	0.58
CS3		98.63×48.92	255.6	1.66

1.3　试验设备与方案

试验设备采用 MTS815 岩石力学测试系统和 PCI-2 声发射采集系统。MTS815 轴向加载传感器的量程为 1 000 kN，采用轴向位移控制方式，加载速率为 0.1 mm/min。声发射系统主放大器增益设定为 40 dB，信号检测阈值为 45 dB，传感器的谐振频率为 20～400 kHz。每个试样安装 6 个高精度传感器，上下各 3 个，距试样端面 8 mm。为了提高声发射信号的采集效果，在试样与声发射探头间涂抹高真空硅脂。加载过程中，严格保持力学与声发射系统时间同步。声发射探头和环向引伸计布置如图 2 所示。

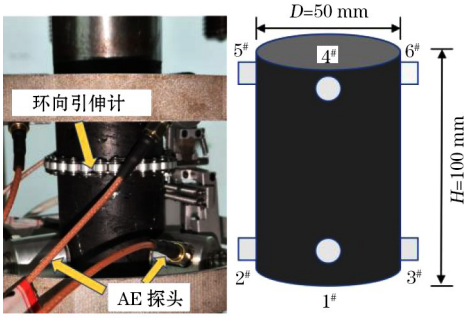


图 2　声发射探头和环向引伸计布置

Fig.2　Arrangement of acoustic emission sensors and circumferential extensometers

2　试验结果与分析

2.1　煤岩的力学性能

水对煤岩的力学性质及变形破坏具有重要影响，自然状态与浸水煤岩的应力-应变曲线如图 3 所示。根据压缩过程中煤岩裂隙的发育情况，其应力-应变曲线可依次分为孔隙压密、弹性、裂纹稳定扩展和裂纹不稳定扩展 4 个阶段。由图 3 可知，自然状态煤岩在加载初期的裂隙闭合较显著，曲线增长更平稳，而浸水煤岩因水压力作用，前期压密阶段不明显。

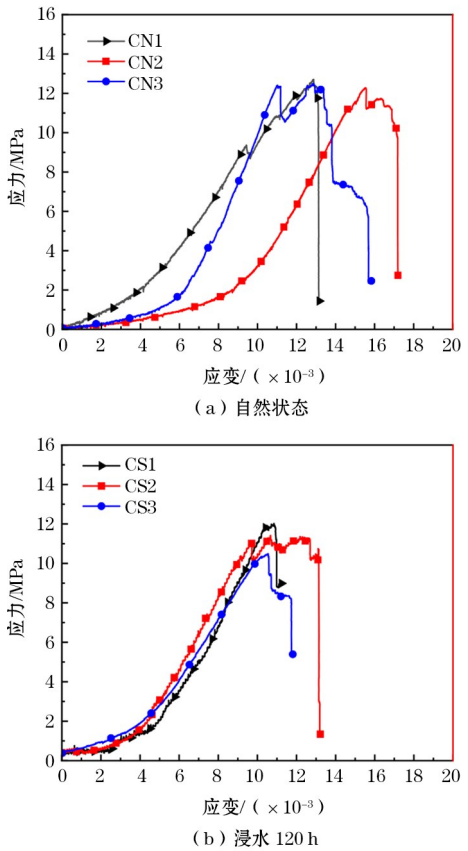


图 3　煤岩试样应力-应变曲线

Fig.3　Stress-strain curves of coal-rock samples

两组煤岩试样的单轴抗压强度见表 2。由表 2 可知，自然状态煤岩的平均单轴抗压强度为 13.29 MPa，浸水 120 h 煤岩的平均单轴抗压强度为 11.30 MPa，降幅达 14.97%。

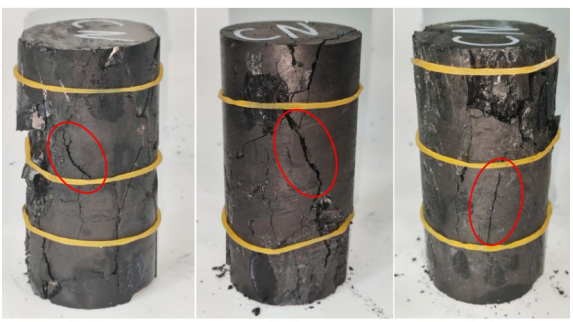
表 2　煤岩试样单轴抗压强度测试结果

Table 2　Test results of uniaxial compressive strength of coal-rock samples

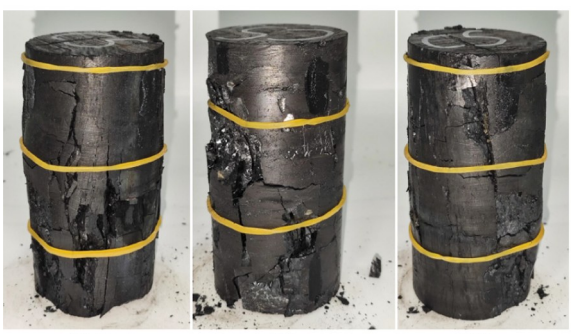
试样编号	抗压强度/MPa	平均抗压强度/MPa
CN1	12.71	
CN2	13.56	13.29
CN3	13.59	
CS1	12.02	
CS2	11.41	11.30
CS3	10.48	

2.2 煤岩的宏观破坏形态特征

自然状态及浸水状态下的煤岩破裂形态如图 4 所示。由图 4 可知,自然与浸水煤岩的宏观破裂形态存在显著差异,在自然状态下,煤岩裂纹呈现出明显的斜交特征(见图 4(a)中红色椭圆圈,颜色标识见电子版),具有较强的剪切破坏特征,整体性较好,局部破裂较为松散,裂纹数量适中。相比之下,浸水处理煤岩中裂纹扩展方向更复杂,破坏程度明显加剧,整体更为破碎,脆性破坏特征显著。综上可知,浸水作用显著劣化了煤岩力学性能,使其更易发生破坏。



(a) 自然状态



(b) 浸水状态

图 4 自然状态及浸水状态下的煤岩破裂形态

Fig.4 Coal-rock fracture morphology under natural state and water-soaked state

2.3 声发射响应特性分析

煤岩在变形破坏过程中产生的声发射现象是反映煤岩内部破坏的重要信息。其中,声发射振铃计数作为一种关键特征参数,是研究煤岩变形破坏和失稳预兆的重要指标,可表示岩石内部裂隙的扩展频率[16-17]。AE 计数是指监测过程中,声发射波形信号幅值超过设定门槛值的振荡次数,累计 AE 计数则为各时段 AE 计数的累加值。加载过程中煤岩 AE 计数演变特征如图 5 所示。由图 5 可知,煤岩在各阶段均有不同程度的声发射信号产生,AE 计数峰值出现在峰值应力附近,累计 AE 计数曲线与煤岩的应力-应变曲线呈现出较强的一致性,但浸水煤岩与自然状态煤岩的试验结果存在显著差异。

(1) 初始压密阶段。煤岩内部存在大量孔隙与裂隙,在应力作用下孔隙、裂隙开始闭合。该阶段自然状态煤岩有少量声发射信号产生,而浸水煤岩几乎无声发射信号产生。

(2) 弹性阶段。该阶段孔隙、裂隙基本闭合,煤岩以弹性变形为主,无明显新裂纹产生。声发射信号主要来自局部晶格错动或微小摩擦事件,尽管 AE 计数和累计 AE 计数有所增加,但相对于整个应力-应变过程,其数值较低,对试件整体结构稳定性影响甚微。

(3) 裂纹稳定扩展阶段。随应力持续增大,新微裂纹萌生并稳定扩展。AE 计数显著增加,累计 AE 计数呈类指数增长,局部出现突变点,表明煤岩即将进入不稳定扩展阶段。

(4) 裂纹不稳定扩展阶段。随应力进一步增大,主裂纹贯通,伴随碎屑崩落或分层剥离,试件宏观破裂。该阶段 AE 计数爆发式增长,达到最大值,累计 AE 计数呈指数型激增。

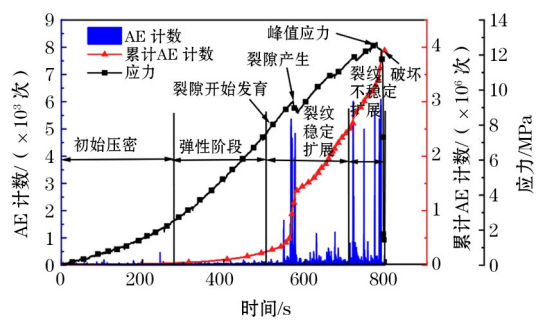


图 5 加载过程中煤岩 AE 计数演变特征

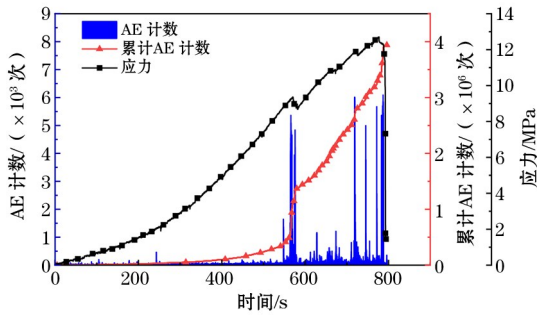
Fig.5 Evolution characteristics of AE count of coal-rock during loading process

加载过程中煤岩 AE 计数、累计 AE 计数-时间-应力的关系如图 6 所示。由图 6(a)可知,自然状态下煤岩加载至 550 s 时,振铃计数首次达到峰值,对应的应力约为峰值应力的 72.25%;此后,声发射进入平静期,在 585~725 s 之间,煤岩内部活动明显减弱;直至 725 s,煤岩应力达到峰值应力的 94.42%,振铃计数出现第二个峰值,煤岩进入剧烈活动期;791 s 时出现最后一个峰值点,随后声发射活动逐渐减弱;当加载至 795 s 时,应力迅速下降,煤岩发生破坏。

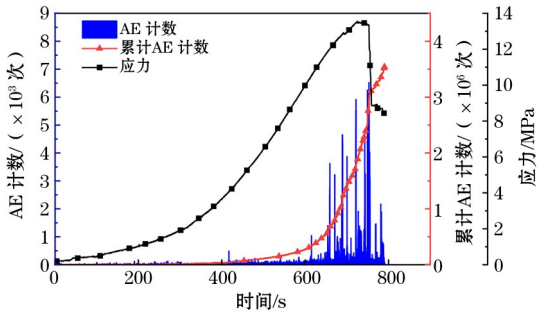
由图 6(d)可知,浸水煤岩振铃计数的首次峰值出现在加载至 532 s 时,随后约 63 s 内,岩石内部活动较弱;加载至第 595 s 时,振铃计数出现第二个峰值,对应的应力达到峰值应力的 90.07%;加载至

653 s时，浸水煤岩产生明显的纵向裂缝，并伴随有较大声响。试样破坏后，声发射信号明显减弱。上述分析表明，煤岩振铃计数在加载过程中会出现多个峰值，其中峰值段及相对平静期可作为自然状态及浸水煤岩失稳前的预警特征。

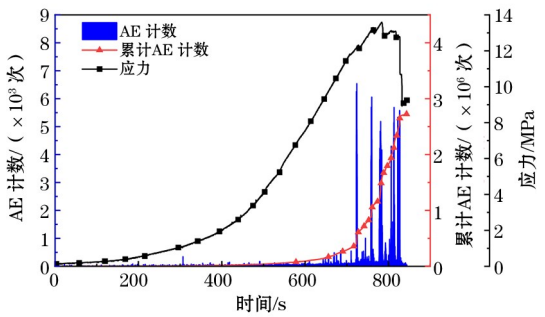
根据试验数据，自然状态煤岩的累计 AE 计数显著高于浸水煤岩。在单轴压缩过程中，自然状态煤岩的累计 AE 计数达到 4×10^6 次，而浸水煤岩的累计 AE 计数降至 2×10^6 次。这是由于水分子填充孔隙，导致声发射信号衰减率增加。



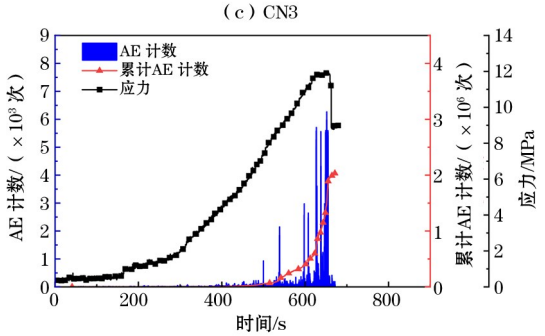
（a）CN1



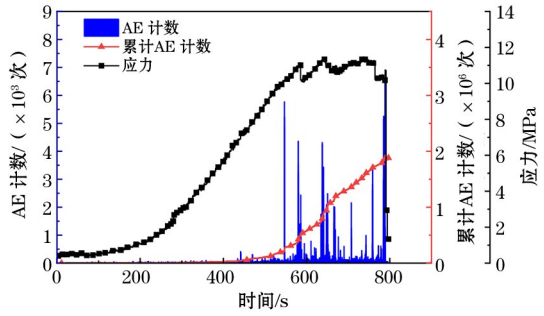
（b）CN2



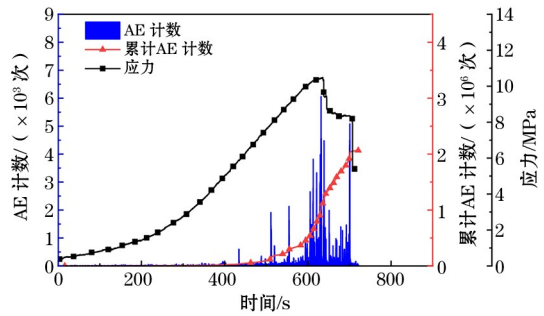
（c）CN3



（d）CS1



（e）CS2



（f）CS3

图 6　加载过程中煤岩试样 AE 计数、累计 AE 计数、应力与时间关系

Fig.6　Relationship between ring count, cumulative ring count, stress and time of coal-rock during loading process

声发射振铃计数和能量均反映浸水煤岩受载破裂过程的动态演化特征[18-19]。以声发射信号能量、数量为依据，统计分析单轴加载下煤岩的声发射监测数据，如图 7 所示。从图 7 中可以看出，煤岩破裂过程中，低能微弱信号占比超过 95%，且在各阶段分布较为均匀，导致高能信号特征容易被掩盖，造成前兆信息识别存在偏差。已有研究表明，由大尺度裂纹产生的声发射信号是判断岩石破裂失稳的重要前兆信息[20-27]。因此，构建针对浸水煤岩关键破裂事件的声发射信号筛选方法，可有效提取关键声发射特征信号，从而提高浸水煤岩破坏前兆特征分析的准确性。

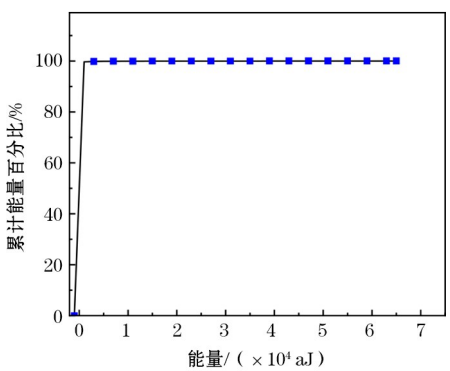


图 7　累计能量百分比曲线

Fig.7　Cumulative energy percentage curve

3 破裂事件的声发射优势信号提取

3.1 优势信号提取方法

煤岩在破裂过程中,其内部微裂纹的萌生与扩展会激发显著的声发射响应,每秒可产生数千至上万个声发射信号。为从复杂信号中有效提取表征煤岩破裂前兆的声发射关键特征,并抑制低能信号及噪声干扰,声发射优势信号提取具有重要意义。

在向非线性阶段过渡的过程中,煤岩内部微裂隙的活动显著增强,能量演化剧烈,损伤应力点后的声发射信号更能表征失稳前兆特征。基于此,结合损伤应力点与能量贡献率对声发射信号进行筛选。首先,通过应变测量确定损伤应力点,并以该应力点为基准设定损伤应力点时间窗口,筛选该时间段内的声发射信号;随后,依据能量贡献率设定阈值进行进一步筛选;最后,得到同时满足时间窗口约束与能量阈值条件的声发射优势信号集合。

设定声发射信号集合 $S=\{s_i\}$,其中,每个信号 s_i 有时间属性 t_i 和能量属性 E_i,损伤应力点对应的时间为 t_0,E_i 表示声发射信号携带的能量,计算公式如下:

$$E_i=\frac{1}{R}\int_{t_1}^{t_2}U_i^2(t)\mathrm{d}t \tag{1}$$

$$E_t=\sum_{i=1}^{N}E_i \tag{2}$$

式中:R 为采样阻抗,Ω;t_1 和 t_2 分别为声发射事件信号的开始与结束时间,s;U 为采集信号电压,V;E_t 为总能量,aJ。

能量贡献率 C_i 表示第 i 个信号在总能量中的占比,是筛选优势信号的重要依据,C_i 计算公式如下:

$$C_i=\frac{E_i}{E_t}\times 100\%(i=1,2,3,\cdots,N) \tag{3}$$

基于贡献度排序算法,建立能量权重占比的统计分布函数 $F(C_i)$,见式(4):

$$F(C_i)=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}H(C_j\leqslant C_i) \tag{4}$$

式中,H 为阶跃函数。

通过分析 $F(C_i)$ 的曲线特征,确定筛选阈值 C_0,选择 $F(C_0)\approx 95\%$,即保留贡献率最高的 5% 的信号。

此外,只保留同时满足两个条件的信号作为优势信号集合 S_v,可表示为:

$$S_v=\{s_i\in S\mid t_i>t_0\ \text{且}\ C_i>C_0\} \tag{5}$$

3.2 试验结果计算与分析

基于所构建的声发射信号提取方法,得到的优势信号较好地保留了煤岩破坏失稳前关键破裂事件的声发射信息。声发射信号筛选结果见表 3。

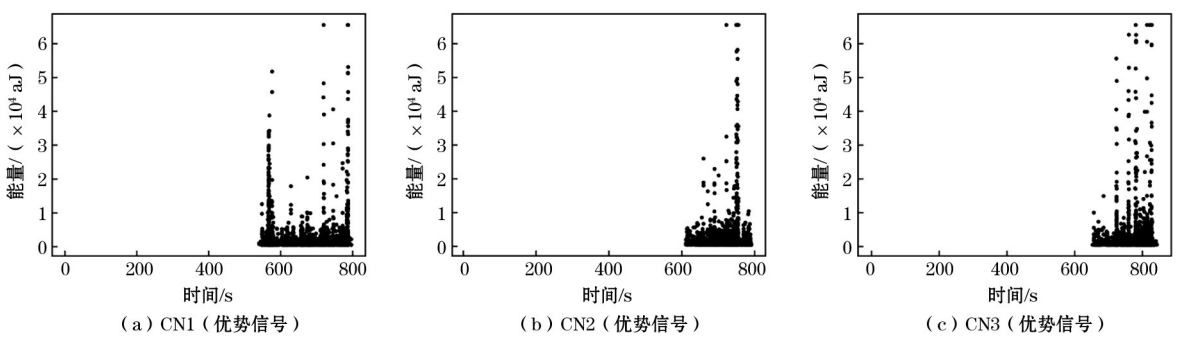
表 3 声发射信号筛选结果

Table 3 Screening results of acoustic emission signal

试样编号	t_0/s	C_0/aJ	原有信号数量/个	优势信号数量/个	优势信号数量占比/%
CN1	539	119	203 919	2 395	1.17
CN2	610	164	151 196	2 433	1.61
CN3	656	205	99 074	2 354	2.38
CS1	530	179	80 801	2 136	2.64
CS2	538	114	117 030	2 221	1.90
CS3	513	152	112 057	2 394	2.14

由表 3 可知,浸水处理组(CS)煤岩最终确定的能量阈值普遍低于自然状态组(CN)煤岩,但优势信号数量占比更高。这表明浸水处理可能降低了单个事件的能量释放,同时增加了关键能量事件的频率。相较于自然状态组,浸水处理显著改变了煤岩的声发射特性和破坏行为,表明水分影响了煤岩内部的裂纹扩展和能量释放机制,使加载过程中关键能量事件更加频繁,增加潜在煤岩破坏风险。

声发射信号提取前后对比分析结果如图 8 所示。由图 8 可知,两组煤岩信号特征存在明显差异,自然状态煤岩通过原生裂隙摩擦耗散能量,主裂纹的形成需更高应力积累,导致高能量释放滞后,整体破裂过程相对较长,声发射高能量集中爆发时刻大约在 700~800 s 之间。而浸水煤岩由于孔隙水渗入,在孔隙内产生张应力,使其声发射高能量信号集中爆发时间提前至 600 s 左右,煤岩更早发生破裂。



(a) CN1(优势信号) (b) CN2(优势信号) (c) CN3(优势信号)

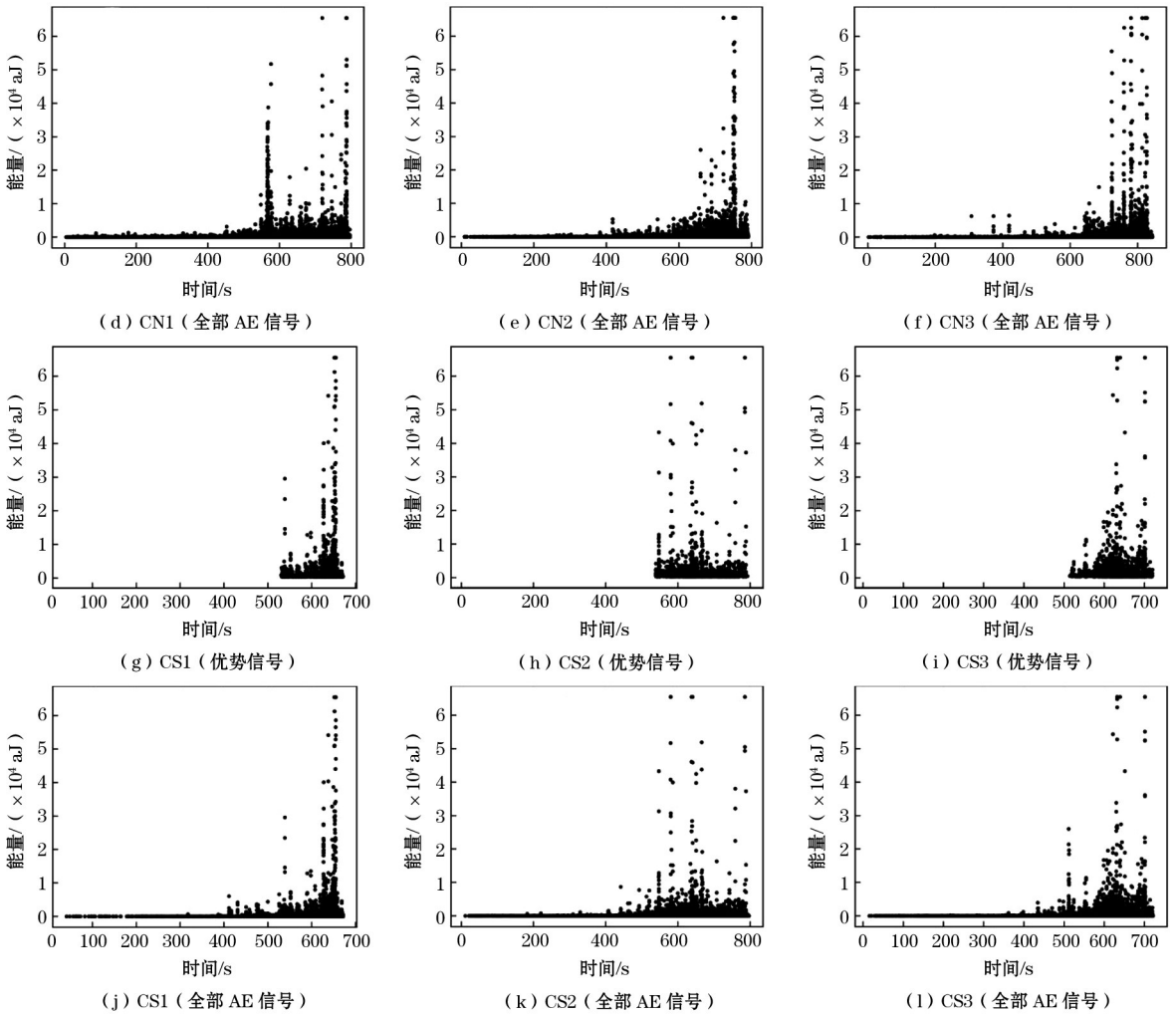


图 8　声发射信号提取前后对比分析

Fig.8　Comparison and analysis of acoustic emission signals before and after extraction

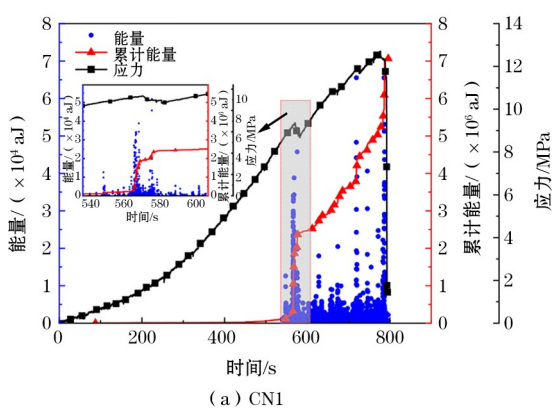
4　讨论

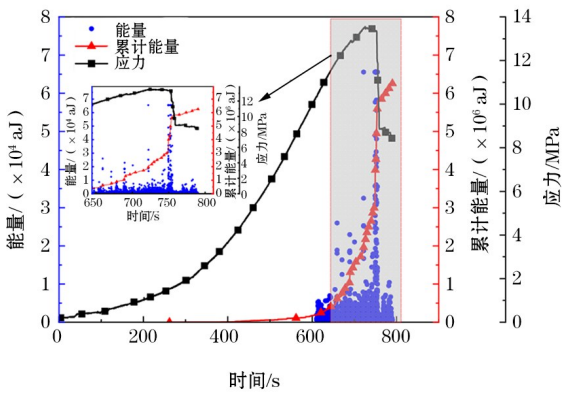
声发射能量与频率分析是判识煤岩破坏前兆的常用方法。本章节主要对提取的优势信号开展破坏前兆一致性检验。

4.1　优势信号能量分析

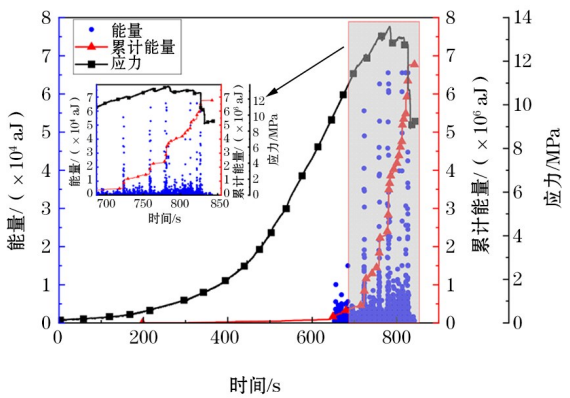
应力、声发射累计能量曲线与优势信号的筛选结果如图 9 所示。由图 9 可知，提取后的声发射信号与整个加载过程呈现良好对应关系，其能量演化拐点与应力调整拐点高度吻合。加载过程中，声发射能量表现出明显的分阶段特征，累计能量曲线直观反映了煤岩破裂过程中能量“先蓄积后释放”的动态规律。在不稳定破裂阶段，煤岩展现出快速蓄能的高风险特征，这一异常能量演化可作为灾变前兆的重要判据。

已有研究证实，煤岩结构稳定性与其破裂时的能量释放特征紧密相关。高能量声发射信号的聚集表明应力集中程度升高，预示着灾变临近[28-30]。张新[31]、薛熠等[32]研究发现，煤岩破裂时高能信号的集中出现使声发射累计能量曲线呈现多级阶梯状。本文提取的声发射事件累计能量曲线同样呈现阶梯状特征，验证了此方法可以有效筛选出浸水煤岩破裂失稳声发射前兆对应的优势信号。

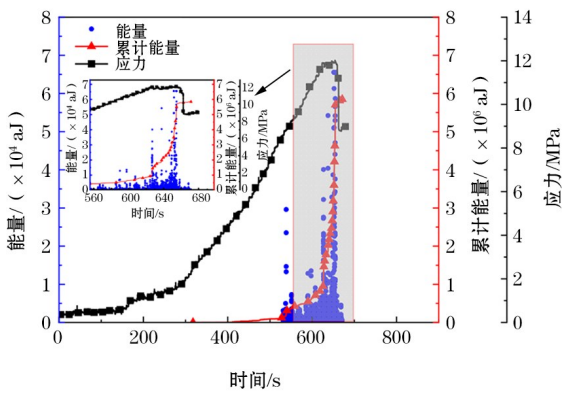




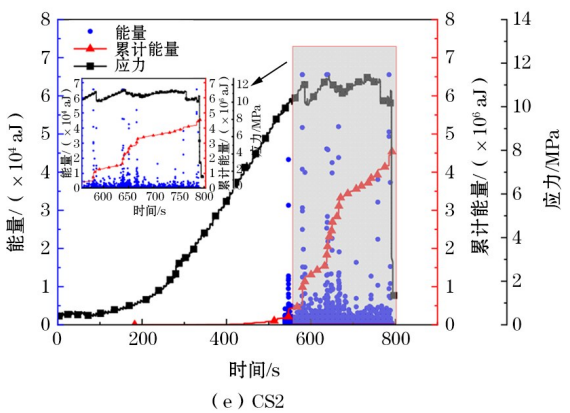
(b) CN2



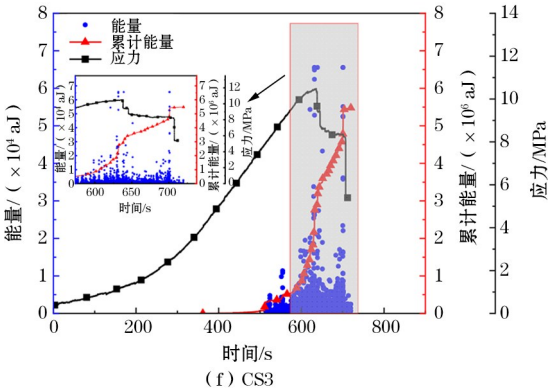
(c) CN3



(d) CS1



(e) CS2



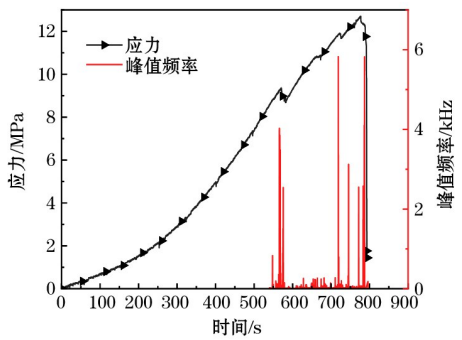
(f) CS3

图 9 应力、声发射累计能量曲线与优势信号的筛选结果

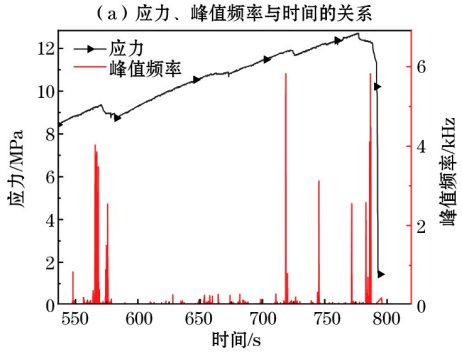
Fig.9 Screening results of stress, acoustic emission cumulative energy curves and dominant signal

4.2 优势信号峰值频率特征分析

自然状态煤岩加载过程中,应力、优势信号峰值频率演化特征如图 10 所示。由图 10 可知,优势信号的峰值频率与煤岩破坏阶段高度对应。加载初期,声发射事件峰值频率偏低,煤岩内部活动简单;加载至 548 s 时,首次出现峰值频率突变,为 0.85 kHz,随后进入短暂平静期;加载至 562 s 时,峰值频率急剧上升至 3.99 kHz,对应加载应力为峰值应力的 72.07%,煤岩内部活动趋于复杂;加载至 578 s 时,出现了较长平静期,平静期共出现了 5 次,最后一次峰值频率突变后,煤岩突发失稳破坏。



(a) 应力、峰值频率与时间的关系

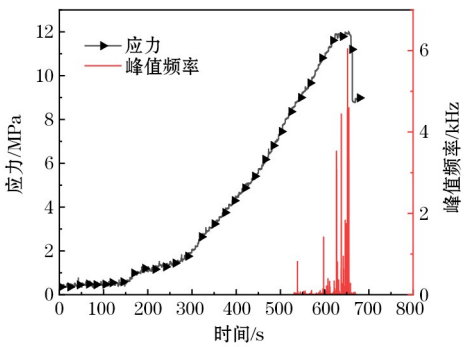


(b) 局部放大图

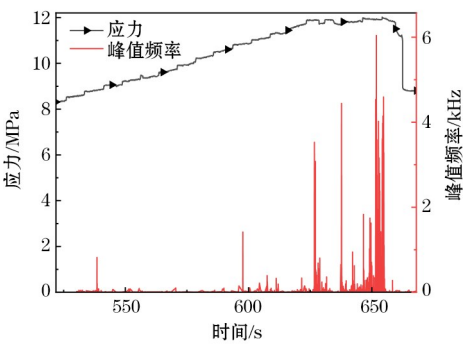
图 10 自然状态煤岩应力、优势信号峰值频率演化特征

Fig.10 Evolution characteristics of stress and peak frequency of dominant signals in natural-state coal-rock

浸水煤岩应力、优势信号峰值频率演化特征如图 11 所示。从图 11 中可以看出，浸水煤岩加载至 537.98 s 时，首次出现峰值频率突增，达 0.79 kHz；随后进入较长平静期，平静期共 3 次；加载至 597.28 s 时，首次平静期结束，此时加载应力为峰值应力的 88.61%。



(a) 应力、峰值频率与时间的关系



(b) 局部放大图

图 11　浸水煤岩应力、优势信号峰值频率演化特征

Fig.11　Evolution characteristics of stress and peak frequency of dominant signals in water-soaked coal-rock

综上所述，优势信号峰值频率的突增点与应力曲线拐点同步，可据此实现从首次频谱异常至平静期结束的多级预警。这一规律表明，高能事件直接驱动煤岩宏观破裂，直观验证了能量贡献率筛选方法在剔除噪声、提取高频前兆信号中的有效性。

5　结论

(1) 浸水作用下，煤岩力学性能显著劣化，相比自然状态煤岩，浸水煤岩平均单轴抗压强度降低 14.79%，裂纹扩展方向更复杂，破坏程度明显加剧，整体更为破碎，脆性破坏特征显著。

(2) 煤岩振铃计数在加载过程中会出现多个峰值，其中峰值段及相对平静期可作为自然状态及浸水煤岩失稳前的预警特征；在单轴压缩过程中，自然状态煤岩的累计 AE 计数达到 4×10^6 次，而浸水煤岩的累计 AE 计数降至 2×10^6 次，自然状态煤岩的累计 AE 计数显著高于浸水煤岩，累计 AE 计数与煤岩的应力-应变曲线具有较好的一致性。

(3) 基于能量贡献率与损伤应力时间窗口构建的声发射优势信号提取方法，能够有效提取煤岩破裂过程中关键破裂事件的声发射信号。自然状态煤岩声发射高能量集中爆发时刻在 700～800 s 之间，而浸水煤岩声发射高能量信号集中爆发时间提前至 600 s 左右，优势信号能量阈值更低、优势信号数量占比更高，表明浸水作用降低了单个事件的能量释放，却增加了关键能量事件频率，使关键声发射信号增加。

(4) 优势信号的能量演化拐点、峰值频率突增点与应力调整拐点高度对应，累计能量曲线呈现阶梯状上升，直观验证了能量贡献率筛选方法在剔除噪声、提取高频前兆信号的有效性。研究结果可为工程稳定性预测提供理论依据。

参考文献(References)：

[1] 朱术云，宋淑光，孙强，等.不同试验条件下深部下组煤底板水岩相互作用特征[J].岩石力学与工程学报，2014，33(增刊1)：3231-3237.
Zhu Shuyun, Song Shuguang, Sun Qiang, et al. Characteristics of interaction process between deep rock of lower coal seam floor and water under different test conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Suppl.1): 3231-3237.

[2] 吴贤振，刘祥鑫，梁正召，等.不同岩石破裂全过程的声发射序列分形特征试验研究[J].岩土力学，2012，33(12)：3561-3569.
Wu Xianzhen, Liu Xiangxin, Liang Zhengzhao, et al. Experimental study of fractal dimension of AE serials of different rocks under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3561-3569.

[3] Ju Jinfeng, Li Quansheng, Xu Jialin, et al. Self-healing effect of water-conducting fractures due to water-rock interactions in undermined rock strata and its mechanisms [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(1): 287-297.

[4] 赵科.煤体结构面剪切力学特性的数值模拟研究[J].煤炭科学技术，2021，49(12)：89-95.
Zhao Ke. Numerical simulation of shear mechanical properties of coal structural plane[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(12): 89-95.

[5] 杨夺，王文才.水浸煤岩体强度变化研究[J].陕西煤炭，2021，40(2)：6-9+18.
Yang Duo, Wang Wencai. Study on strength change of water-immersed coal and rock mass[J]. Shaanxi Coal, 2021, 40(2): 6-9+18.

[6] 吴宝杨,宋佳辉,李鹏,等.不同浸水作用下煤岩损伤及力学性质劣化规律[J].地下空间与工程学报,2024,20(增刊1):84-93.
Wu Baoyang, Song Jiahui, Li Peng, et al. Damage and mechanical property deterioration of coal rocks under different water flooding[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2024,20(Suppl.1):84-93.

[7] 徐达.浸润煤岩力学特性试验及本构关系研究[D].西安:西安科技大学,2019.
Xu Da. Experimental study on mechanical properties of infiltrated coal and its constitutive relation[D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology,2019.

[8] 郝俊.浸水煤岩的强度弱化及刚度损伤试验研究[J].能源技术与管理,2023,48(1):113-115.
Hao Jun. Experimental study on strength weakening and stiffness damage of water-immersed coal and rock[J]. Energy Technology and Management,2023,48(1):113-115.

[9] 刘保县,黄敬林,王泽云,等.单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊1):3234-3238.
Liu Baoxian, Huang Jinglin, Wang Zeyun, et al. Study on damage evolution and acoustic emission character of coal-rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(Suppl.1):3234-3238.

[10] 尹光志,秦虎,黄滚.不同应力路径下含瓦斯煤岩渗流特性与声发射特征实验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(7):1315-1320.
Yin Guangzhi, Qin Hu, Huang Gun. Experimental study of characteristics of seepage and acoustic emission of gas-filled coal under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(7):1315-1320.

[11] 李杨,袁安营.不同岩性煤岩体声发射特征参数及破坏前兆信息研究[J].煤炭工程,2018,50(12):86-89.
Li Yang, Yuan Anying. Research on A-E characteristic parameters and damage precursor information of coal and rock mass with different lithology[J]. Coal Engineering, 2018,50(12):86-89.

[12] 胡千庭,刘荣辉,李全贵,等.单轴压缩下典型煤岩破坏的声发射特征研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(6):1769-1781.
Hu Qianting, Liu Ronghui, Li Quangui, et al. Acoustic emission characteristics stucty of typical coal rock failure under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(6):1769-1781.

[13] 冯龙飞,王皓,王晓东,等.煤冲击破坏的微破裂演化特征及前兆识别[J].岩石力学与工程学报,2022,41(7):1440-1452.
Feng Longfei, Wang Hao, Wang Xiaodong, et al. Micro-fracture evolution characteristics and precursor identification of coal impact failure[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(7):1440-1452.

[14] 王恩元,何学秋,刘贞堂,等.煤体破裂声发射的频谱特征研究[J].煤炭学报,2004(3):289-292.
Wang Enyuan, He Xueqiu, Liu Zhentang, et al. Study on frequency spectrum characteristics of acoustic emission in coal or rock deformation and fracture[J]. Journal of China Coal Society,2004(3):289-292.

[15] 张艳博,梁鹏,刘祥鑫,等.基于声发射信号主频和熵值的岩石破裂前兆试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增刊1):2959-2967.
Zhang Yanbo, Liang Peng, Liu Xiangxin, et al. Experimental study on precursor of rock burst based on acoustic emission signal dominant-frequency and entropy[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015, 34(Suppl.1):2959-2967.

[16] 杨永杰,王德超,李博,等.煤岩三轴压缩损伤破坏声发射特征[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(1):127-135.
Yang Yongjie, Wang Dechao, Li Bo, et al. Acoustic emission characteristics of coal damage failure under triaxial compression[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015,23(1):127-135.

[17] 赵兴东,陈长华,刘建坡,等.不同岩石声发射活动特性的实验研究[J].东北大学学报(自然科学版),2008(11):1633-1636.
Zhao Xingdong, Chen Changhua, Liu Jianpo, et al. Experimental study on AE activity characteristics of different rock samples[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2008(11):1633-1636.

[18] 张晖辉,颜玉定,余怀忠,等.循环载荷下大试件岩石破坏声发射实验:岩石破坏前兆的研究[J].岩石力学与工程学报,2004(21):3621-3628.
Zhang Huihui, Yan Yuding, Yu Huaizhong, et al. Acoustic emission experimental research on large-scaled rock failure under cycling load: fracture precursor of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(21): 3621-3628.

[19] 张晖辉,刘峰,常福清.岩石损伤破坏过程声发射试验及其能量特征分析[J].公路交通科技,2011,28(3):48-54.
Zhang Huihui, Liu Feng, Chang Fuqing. Experimental study of acoustic emission characteristics during rock failure process and energy properties[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(3): 48-54.

[20] 孙清佩,张志镇,杜雷鸣,等.层理倾角对岩石力学与声发射特征的影响研究[J].金属矿山,2017(2):7-13.
Sun Qingpei, Zhang Zhizhen, Du Leiming, et al. Effect of bedding angle on mechanical and acoustic emission characteristics of layered rock[J]. Metal Mine, 2017(2): 7-13.

[21] 李庶林,尹贤刚,王泳嘉,等.单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J].岩石力学与工程学报,2004(15):2499-2503.

Li Shulin, Yin Xian'gang, Wang Yongjia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004(15):2499-2503.

[22] 纪洪广,卢翔.常规三轴压缩下花岗岩声发射特征及其主破裂前兆信息研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(4):694-702.
Ji Hongguang, Lu Xiang. Study on acoustic emission characteristics of granite and its main fracture precursor information under conventional triaxial compression [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(4):694-702.

[23] 黄彦华,杨圣奇.饱水灰岩巴西试验准静态加载应变率效应研究[J].岩土工程学报,2015,37(5):802-811.
Huang Yanhua, Yang Shengqi. Quasi-static loading strain rate effects on saturated limestone based on Brazilian splitting test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(5):802-811.

[24] 邓朝福,刘建锋,陈亮,等.不同粒径花岗岩断裂力学行为及声发射特征研究[J].岩土力学,2016,37(8):2313-2320.
Deng Chaofu, Liu Jianfeng, Chen Liang, et al. Fracture mechanical behaviors and acoustic emission characteristics of Beishan granites with different particle sizes[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(8):2313-2320.

[25] 丛宇,冯夏庭,郑颖人,等.不同应力路径大理岩声发射破坏前兆的试验研究[J].岩土工程学报,2016,38(7):1193-1201.
Cong Yu, Feng Xiating, Zheng Yingren, et al. Experimental study on acoustic emission failure precursors of marble under different stress paths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2016,38(7):1193-1201.

[26] 程立朝,许江,冯丹,等.岩石剪切破坏裂纹演化特征量化分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(1):31-39.
Cheng Lichao, Xu Jiang, Feng Dan, et al. Quantitative analysis of crack evolution characteristics of rock shear failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(1):31-39.

[27] 陈国庆,赵聪,刘辉,等.不同应力路径下岩桥试验的声发射特征研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(9):1792-1804.
Chen Guoqing, Zhao Cong, Liu Hui, et al. Acoustic emission characteristics of rock bridge test under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(9):1792-1804.

[28] 李元辉,刘建坡,赵兴东,等.岩石破裂过程中的声发射 b 值及分形特征研究[J].岩土力学,2009,30(9):2559-2563+2574.
Li Yuanhui, Liu Jianpo, Zhao Xingdong, et al. Study on b-value and fractal dimension of acoustic emission during rock failure process[J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30(9):2559-2563+2574.

[29] 丁鑫,肖晓春,吕祥锋,等.煤岩破裂过程声发射时-频信号特征与演化机制[J].煤炭学报,2019,44(10):2999-3011.
Ding Xin, Xiao Xiaochun, Lyu Xiangfeng, et al. Characteristics and evolution mechanism of acoustic emission time-frequency signal during coal failure process [J]. Journal of China Coal Society,2019,44(10):2999-3011.

[30] 王岗,潘一山,李忠华,等.煤岩破裂裂纹演化过程声-电信号时频特征研究[J].煤炭科学技术,2018,46(10):90-98.
Wang Gang, Pan Yishan, Li Zhonghua, et al. Study on time-frequency characteristics of acoustic-charge signals in fracture and crack evolution process of coal and rock[J]. Coal Science and Technology,2018,46(10):90-98.

[31] 张新.煤岩水力压裂诱发声发射波形特征及信号识别研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
Zhang Xin. Characteristics of hydraulic fracturing induced AE waveforms and signal detection [D]. Xuzhou: China University of Science and Technology,2019.

[32] 薛熠,刘嘉,梁鑫,等.瓦斯压力作用下煤岩的声发射非线性演化特征[J].岩土工程学报,2021,43(增刊1):241-245.
Xue Yi, Liu Jia, Liang Xin, et al. Nonlinear evolution characteristics of acoustic emission and fracture mechanism of coal under gas pressure [J]. Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(Suppl.1):241-245.